THESIS

BONN

1966

ULTRASCHALL-BIOMETRIE DES MENSCHLICHEN AUGES IN ABHÄNGIGKEIT VOM LEBENSALTER

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt von
Udo Sprenger
aus Königsberg

Bonn 1966

LANE MEDICAL LIBRARY OF
STANFORD UNIVERSITY
300 PASTEUR
PALO ALTO, CALIFORNIA

ULTRASCHALL-BIOMETRIE DES MENSCHLICHEN AUGES IN ABHÄNGIGKEIT VOM LEBENSALTER

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt von
Udo Sprenger
aus Königsberg

Bonn 1966

Angefertigt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der
Universität Bonn.

Referent: Privatdozent Dr.O.Hockwin
Korreferent: Professor Dr.E.Weigelin

Tag der mündlichen Prüfung: 22.5.67

Aus dem Institut für experimentelle
Ophthalmologie, Bonn.
Direktor: Professor Dr.E.Weigelin.

In Dankbarkeit
MEINEN ELTERN
gewidmet

Gliederung:

1.	Literaturverzeichnis
1.1.	Einleitung und Problemstellung
2.	Literaturteil
2.1.	Definition des Ultraschalls
2.2.	Erzeugung von Ultraschallwellen
2.3.	Gleichschall und Wechselschall
2.4.	Arbeitsweise von piezoelektrischen Ultraschall-Impuls-Geräten
2.4.1.	Reflexion,Brechung und Schallwellenwiderstand
2.4.2.	Absorption und Wärme
2.4.3.	Nahfeld und Fernfeld
2.5.	Anwendung des Ultraschalls in der Medizin
2.6.	Anwendung des Ultraschalls in der Ophthalmologie
3.	Experimenteller Teil
3.1.	Beschreibung der Geräte
3.1.1.	Das Meßgerät
3.1.2.	Schallköpfe
3.1.3.	Haltegerät der Schallköpfe
3.1.4.	Koppelungsmittel
3.2.	Eichung des Gerätes
3.3.	Meßmethodik
3.4.	Berechnungen
3.4.1.	Rechentabellen
3.4.2.	Testbogen
3.4.3.	Statistik
3.5.	Material
3.6.	Ergebnisse

3.6.1. Tieraugen
3.6.2. Menschliche Augen
3.6.2.1. Fehler der Methodik
3.6.2.2. Tiefe der Vorderkammer des menschlichen Auges
3.6.2.3. Dicke der Linse des menschlichen Auges
3.6.2.4. Länge des Glaskörpers des menschlichen Auges
3.6.2.5. Länge der optischen Achse des menschlichen Auges
3.7. Relationen der Meßgrößen
3.7.1. Linse - Vorderkammer
3.7.2. Linse - Glaskörper
3.8. Diskussion
3.9. Zusammenfassung

1. Literaturverzeichnis.

1.ANSTETT,P. "Ergebnisse der Ultraschallbehandlung bei Asthma." Erlanger Ultraschalltagung,(1949).

2.BERGMANN,L. "Der Ultraschall." S.Hirzel,Verlag Stuttgart,(1954).

3.VON BAHR,G. "Measurements of the thickness of the cornea." Acta ophthal.26,247, (1948).

4.BUSCHMANN,W. "Zur ultraschalldiagnostischen Messung der Achsenlänge des Auges." Klin.Mbl.Augenheilk. 144,801,(1964).

5.FRANKEN,S. "Measuring the length of eye with the help of ultrasound echo." Ophthalmologica(Basel) 143,82-85,(1962).

6.GERNET,H. "Zur Längenmessung des Auges am Lebenden." Albr.v.Graefes Arch. ophthal.166,402-411, (1963).

7.GERNET,H. "Über die Achsenlänge und Brechkraft emmetroper,lebender Augen." Albr.v.Graefes Arch. ophthal.166, 424-431, (1963).

8.GERSTNER,R. Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Univ.,Berlin,math.-naturwissenschaftliche Reihe. Jahrgang xiv,Heft 1, 95,(1965).

9.GOLDMANN,H. und R.HAGEN "Zur direkten Messung der Totalbrechkraft des lebenden menschlichen Auges." Ophthalmologica(Basel), 104,15,(1942).

10.HEITE,H.-J. "Statistische Rechenblätter." Lochkartenwerk Schlitz.

11.HINTZELMANN,U. "Ultraschalltherapie rheumatischer Erkrankungen." Deutsche Med.Wochenschrift,72,350-353, (1947).

12.HORVATH,J. "Die morphologischen Veränderungen der Carcinomzellen nach Ultraschalleinwirkung." Deutsche Med.Wochenschrift,72,392,(1947).

13.HÜTER,TH. "Messungen der US-Absorption in tierischen Geweben und ihre Abhängigkeit von der Frequenz." Naturwissenschaften,35, 285,(1948).

14.HÜTER,TH. und R.POHLMANN "Eine optische Methode zur Bestimmung der Ultraschallabsorption in undurchsichtigen und schallweichen Medien." Journ.f.angewandte Physik,1,45,(1949).

15.JÄGER,W. "Tiefenmessung der menschlichen Vorderkammer mit planparallelen Platten." Albr.v.Graefes Arch. ophthal.153,120,(1952).

16.JANSSON,F. "Measurements of intra-ocular distances by ultrasound." Acta ophthal.(Kbh.), Suppl.74,(1963).

17.KLEIFELD,O. "Ultraschallwirkung auf das Tierauge." Bericht der deutschen ophthal.Gesell.57,138, (1951).

18.KLEIFELD,O. "Beobachtungen bei der Behandlung des menschlichen Auges mit Ultraschall." Klin.Mbl.Augenheilk. 123,743,(1953).

19.LADEBURG,H. "Die Kombination von Ultraschall mit der Unterwasser-Dusch-Methode." Kongressbericht der Ultraschalltagung in Rom.Nuovo Cim.7,Suppl. 2,(1950).

20.MATAUSCHEK,R. "Einführung in die Ultraschalltechnik." Berlin,Verlag Technik, (1957).

21.MUNDT,G.H.jr.and W.F.HUGHES,jr. "Ultrasonics in ocular diagnostics." Amer.J.Ophthal.41,488, (1956).

22.MÜLLER,H.K. K.H.HOLSTEGE und O.KLEIFELD "Zur Frage der Ultraschallwirkung auf die Linse und ihren Stoffwechsel." Bericht der deutschen ophthal.Gesell.55, (1 949).

23.NOVER,A. "Klinische Ultraschalluntersuchungen bei Netzhautablösungen und intraocularen Tumoren." Klin.Mbl.Augenheilk. 142,168,(1963).

24.NOVER,A. und W.GROTE "Untersuchungen über die Reflexion des Ultraschalls an der Netzhaut,Aderhaut und Sklera - das sog.Rückwandecho -." Albr.v.Graefes Arch. klin.exp.Ophthal.168, 388-404,(1965).

25.NOVER,A. und W.GROTE "Über die Bestimmung der Achsenlänge des menschlichen Auges mit Ultraschall am Lebenden." Albr.v.Graefes Arch. ophthal.168,405-418,(1965).

26.OKSALA,A. and A.LETHINEN "Measurements of velocity of sound in some parts of the eye." Acta ophthal. 36, 633-639,(1958).

27.OKSALA,A. und A.LETHINEN "Über die diagnostische Verwendung von Ultraschall in der Augenheilkunde." Ophthalmologica(Basel), 134,387,(1957).

28.OKSALA,A. und A.LETHINEN "Das Echogramm in der Diagnostik von Augenkrankheiten." Klin.Mbl.Augenheilk. 137,72,(1960).

29.OKSALA,A. "Bisherige Erfahrungen über die Ultraschalldiagnostik von Augenkrankheiten." Klin.Mbl.Augenheilk. 144,347,(1964).

30.RUSHTON,R.H. "The clinical measurements of axial length of the living eye." Trans.ophthal.Soc.,UK, 58,136,(1938).

31.SCHMUTTER,J. "Untersuchungen über die Altersabhängigkeit des Gewichtes und Volumens von Rinderlinsen." Dissertation,Bonn (1961).

32.SMITH,PR. "Diseases of the crystalline lens and capsule" On the growth of the crystalline lens. Trans.ophthal.,Soc.,UK., 3,79,(1883).

33.SNYDACKER,D. "The relation of the volume of the crystalline lens to the depth of the anterior chamber. Trans.Amer.ophthal. Soc.,54,375,(1956).

34.STALLKAMP,H. "Klinische und experimentelle Ultraschalluntersuchungen am gesunden Auge und bei intraocularen Fremdkörpern." Med.Diss.Köln,(1961).

35.YAMAMOTO,Y. Jap.Journ.of Ophthal. Vol.5,2,April-June(1961)

36.ZEISS,E. "Über Linsenveränderungen an herausgenommenen Rinderlinsen durch Ultraschalleinwirkung." Albr.v.Graefes Arch. ophthal.139,301-322,(1938)

1.1. Einleitung und Problemstellung.

Die ersten Versuche mit Ultraschall und dessen Wirkungen auf isolierte Augenmedien von Tieraugen beschrieb ZEISS,E.(36) im Jahre 1938.Weitere Grundlagen,den Ultraschall in der Ophthalmologie einzusetzen,wurden von MÜLLER,H.K. und Mitarbeiter (22),KLEIFELD,O.(17,18),schließlich von MUNDT,G.H.jr.und HUGHES,W.F.jr.(21) und OKSALA,A. und A.LETHINEN (26,27,28,29) erarbeitet.Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, den Ultraschall in der Ophthalmologie als Hilfsmittel zur Diagnostik und Lokalisation von intraocularen Fremdkörpern,Tumoren und Netzhautablösungen anzuwenden.

Schon damals bestanden Hinweise,daß mit Ultraschallwellen eine Längenmessung der optischen Achse des Auges möglich sei.Die Bestimmung der Schallausbreitungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Augenmedien durch OKSALA,A.und A.LETHINEN (26) und später durch JANSSON,F.(16) schuf erst die Voraussetzung für eine solche Messung.

Damit ergaben sich für die Ophthalmologie eine Reihe von neuen diagnostischen Möglichkeiten.

So kann sich der Untersucher,selbst bei getrübten Medien,wie Corneaverätzungen,Linsentrübungen und Glaskörperblutungen einen Überblick über die Lage und die Größenverhältnisse der einzelnen Augenabschnitte verschaffen.In Fällen von Myopie kann eine Differenzierung in eine Achsen-oder in eine Brechungsmyopie vorgenommen werden.Von Bedeutung ist die Längenmessung der optischen Achse des Auges bei Fällen von Glaucom.Durch

abnormes Dickenwachstum oder durch Aufquellen der Linse kann der Abflußweg des Kammerwassers verlegt werden und daraus ein Glaucomanfall bedingt sein. Die Kenntnis der normalen Linsendicke des entsprechenden Alters ist dabei für die Operationswahl von Wichtigkeit.

In der vorliegenden Arbeit sollen Normwerte der einzelnen Augenabschnitte mit Hilfe der Ultraschalluntersuchungsmethode ermittelt und die Grenzen und Möglichkeiten einer Längenmessung der optischen Achse des Auges und seiner einzelnen Medien aufgezeigt werden.

2. L I T E R A T U R T E I L.

2.1. Definition des Ultraschalls und seine besonderen Eigenschaften.

Schallwellen die eine Frequenz von über 20000 Hz haben,werden als Ultraschallwellen bezeichnet.Die Gesetze der Akustik haben auch für diesen Frequenzbereich ihre Gültigkeit,wenn der Ultraschall auch noch besondere Eigenschaften besitzt.Erstens haben die Ultraschallwellen kurze Wellenlängen,zweitens lassen sie sich für kleine Strecken gebündelt und parallel verlaufend abstrahlen.Es handelt sich dabei um Longitudinalwellen.Lediglich am Rande eines durchschallten Mediums findet eine Streuung statt,die im Extremfall senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht.In diesem Falle spricht man von Transversalwellen.Drittens können mit Ultraschallwellen hohe Schallintensitäten erzeugt werden.

2.2. Erzeugung von Ultraschallwellen.

Der Ultraschall wird heute im wesentlichen von zwei verschiedenen Systemen erzeugt.Die magnetostriktiven Ultraschallgeber gehen auf den "magnetostriktiven Effekt" (oder nach seinem Entdekker auch "Joule-Effekt"genannt)zurück.Wird ein Stab aus ferromagnetischem Material in ein parallel zu ihm verlaufendes magnetisches Feld gebracht,so erfährt er eine Längenveränderung,die sich,je nach dem Vorzeichen des Feldes,in eine Verkürzung oder in eine Verlängerung ausdrückt. Die piezoelektrischen Ultraschallgeber beruhen auf den im Jahre 1880 von den Gebrüdern Curie

entdeckten "piezoelektrischen Effekt".Er besteht darin,daß elektrische Ladungen bei Druck auf oder Zug an Quarzkristallen auftreten.Später wurde der piezoelektrische Effekt auch bei anderen Kristallen,wie z.B. bei Turmalin und Seignettesalz,gefunden.Allen diesen Kristallen ist gemeinsam,daß sie eine oder mehrere polare Achsen bei asymmetrischer Struktur haben.1881 beschrieben die Gebrüder Curie den "umgekehrten piezoelektrischen Effekt".Wird ein piezoelektrischer Kristall in ein Wechselstromfeld gebracht,so wird er zu Schwingungen angeregt,und zwar schwingt er in der Frequenz des Wechselstromfeldes.Die piezoelektrischen Ultraschallgeber werden heute am häufigsten verwandt.

2.3. Gleichschall und Wechselschall.

Die Anwendung des Ultraschalls kann auf zwei Arten erfolgen.Läßt man Ultraschallwellen permanent auf ein Medium einwirken,so spricht man von Gleichschall.Wird dagegen die Abstrahlung von Ultraschallwellen periodisch unterbrochen,so bezeichnet man diese Anwendungsart des Ultraschalls als Wechsel- oder Impulsschall.Das letzte Verfahren wird vor allem in der Medizin verwandt. Es hat nach GERSTNER,R.(8) den Vorteil,daß es am Auge bei niedrigeren Temperaturen zu einem Gleichgewicht zwischen der durch Absorption der Schallenergie entstandenen Wärme und der vom Auge abgestrahlten Wärme kommt.Dieser Gleichgewichtszu-

stand wird durch eine Abkühlung aufrechterhalten,die während der periodischen Unterbrechung der Ultraschallabgabe eintritt.Aus diesem Grunde können auch längere Beschallungen vorgenommen werden,ohne daß es dabei zu Gewebeschädigungen infolge zu großer Wärmeentwicklung kommt.

2.4. Arbeitsweise von piezoelektrischen Ultraschall-Impuls-Geräten.

Die von einem Prüfkopf eines Impulsgerätes abgegebenen Ultraschallwellen werden beim Übergang von einem Medium in ein zweites teilweise reflektiert.Diese reflektierten Schallwellen treffen in dem freien Intervall, in dem keine Ultraschallwellen abgegeben werden,auf den piezoelektrischen Kristall des Prüfkopfes,der gleichzeitig als Sender und Empfänger dient.Dadurch entstehen elektrische Ladungen,die über einen Verstärker zu einem Kathodenstrahloszillographen geleitet und hier in Form von Echozacken abgebildet werden.

2.4.1. Reflexion,Brechung und Schallwellenwiderstand.

Für das Impuls-Echo-Verfahren ist es bedeutungsvoll zu wissen,wie die Schallwellen nach der Reflexion an Grenzflächen wieder auf den Prüfkopf auftreffen.Der Reflexionsgrad gibt das Verhältnis der reflektierten Energie zur

eingefallenen Energie an und errechnet sich aus:

$$R = \left(\frac{\varrho_1 v_1 - \varrho_2 v_2}{\varrho_1 v_1 + \varrho_2 v_2} \right)$$

ϱ = Dichte des Mediums

v_1 und v_2 = Schallausbreitungsgeschwindigkeit im 1.und 2.Medium.

Der Schallwellenwiderstand ergibt sich aus $\varrho \cdot v$, woraus hervorgeht, daß nur dann eine Reflexion von Schallwellen eintreten kann, wenn der Schallwellenwiderstand in den aneinander angrenzenden Medien verschieden ist.

Treffen Schallwellen unter einem Winkel auf eine Grenzfläche, so wird ein Teil von ihnen reflektiert, wobei der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist. Die nicht reflektierten Schallwellen treten in das zweite Medium ein, wobei das Verhältnis der Sinus des Einfallswinkels und des Brechungswinkels gleich dem Verhältnis der Schallausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien ist (Snellius'sches Brechungsgesetz).

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$\sin\alpha_1$ = Einfallswinkel

$\sin\alpha_2$ = Brechungswinkel

v_1 und v_2 = Schallausbreitungsgeschwindigkeit im 1.und 2.Medium.

2.4.2. Absorption und Wärme.

Die einem Medium zugeführte Schallenergie wird zum Teil durch Absorption in Wärme umgewandelt,und zwar ist die Absorption proportional zur Frequenz der Schallwellen.Nach HÜTER,TH.und R.POHLMANN(13,14)spielt die Absorption und damit die Wärmeentwicklung beim Impuls-Echo-Verfahren eine untergeordnete Rolle(s.Abschnitt 2.3.).

2.4.3. Nahfeld und Fernfeld.

Das Schallfeld,das von Ultraschallwellen aufgebaut wird,läßt sich in ein Nahfeld und in ein Fernfeld einteilen.Der Abschnitt,in dem die Schallwellen parallel verlaufen,wird als Nahfeld bezeichnet.Der Bereich,in dem die Schallwellen divergieren,heißt Fernfeld.

Schallkopf Nahfeld Fernfeld

Die Länge des Nahfeldes (L) und die Größe des Winkels (φ),unter dem Schallwellen divergieren,ergeben sich für runde,ebene Schallköpfe vom Durchmesser (D)bei bekannter Wellenlänge nach BERGMANN,L.(2) aus:

$$L = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad ; \quad \sin\varphi = \frac{\lambda}{D} \cdot 1{,}22$$

2.5. Anwendung des Ultraschalls in der Medizin.

Der Ultraschall wird in der Medizin vor allem für therapeutische Zwecke verwandt.

In der Inneren Medizin konnte HINTZELMANN,U.(11) Erfolge nach Ultraschallbehandlung bei rheumatischen Erkrankungen,wie Spondylosis deformans und Morbus Bechterew,erzielen.Sie zeigten sich,besonders bei Morbus Bechterew,in einer Körperstreckung,Abnahme der Thoraxstarre und in der Abnahme der Bauchatmung.HINTZELMANN führte diese Ergebnisse auf die durchblutungs- und durchlymphungsfördernde Wirkung des Ultraschalls zurück,die noch zusätzlich eine Elastizitätszunahme bewirken soll.

Da die Ultraschallwellen eine verfeinerte Zellgewebsmassage darstellen,wobei besonders der gut lokalisierbare thermische Effekt auch in den tieferen Gewebeschichten voll zur Wirkung kommt,hat LADEBURG,H.(19) die Unterwasserduschmethode zur Vervollkommnung mit dem Ultraschall kombiniert.

In der Chirurgie und in der Orthopädie wird der Ultraschall erfolgreich bei ausgedehnten Hämatomen,Durchblutungsstörungen,Ulcus cruris und Muskelverhärtungen eingesetzt.

Bei der Behandlung von Hautsarkomen mit Hautmetastasen konnte HORVATH,J.(12) makroskopisch Hyperämie,zum Teil mit Blasenbildung,erzeugen, mikroskopisch dagegen eine weitgehende Zellzertrümmerung zeigen.Nach ca.8 Wochen waren die Zelltrümmer weitgehend durch Bindegewebe er-

setzt worden.Auch bei Plattenepithelcarcinomen hat HORVATH ähnlich gute Ergebnisse erzielen können.
Nur negative Ergebnisse finden sich bei der Beschallung von Organtumoren,weil die Ultraschallwellen den in der Tiefe liegenden Tumor nicht mit der erforderlichen Intensität erreichen. Außerdem wird das gesunde Gewebe,das in der unmittelbaren Nachbarschaft des Tumors liegt, häufig bei der Beschallung geschädigt.

2.6. Die Anwendung des Ultraschalls in der Ophthalmologie.

In der Ophthalmologie gehen die ersten Versuche mit Ultraschallwellen auf ZEISS,E.(36)zurück. Er erzielte eine irreversible Verflüssigung von frischen Rinderglaskörpern bei Frequenzen von 0,27-0,38 MHz und einer Intensität von 10 W/cm^2. Die Beschallung von frischen Rinderlinsen ergab zwei Arten von Linsentrübungen:

1. Eine zonularisartige,aus feinen Bläschen bestehende Trübungszone in der Embryonalkernzone,die reversibel ist.
2. Eine dichte,weiße fleckenförmige Trübungszone in der äußeren Rinde,die irreversibel ist.

ZEISS erklärte die reversible Linsentrübung als Folge der Kavitationsbildung,die irreversible als Folge der Hitzebildung.
MÜLLER,H.K. und Mitarbeiter(22) konnten bei ihren Versuchen drei Arten der Ultraschallwirkung feststellen.Bei einer Frequenz von 800 Hz

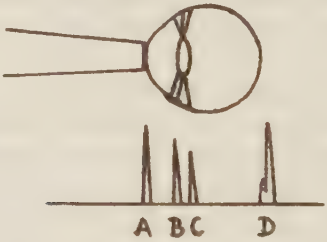
und einer Intensität von 2,5 W/cm^2 kommt es in der Linse durch die mechanische Einwirkung des Ultraschalls zur Kavitationsbildung,d.h. es kommt zu einer Hohlraumbildung,in der sich das vor der Beschallung im Gewebe gelöst gewesene Gas in Form von Bläschen sammelt.Die thermische Wirkung des Ultraschalls zeigt sich in der Ausbildung von Kernkatarakten.Um die chemischen Veränderungen in der Linse zu zeigen, wurde die Rinde von Linsen mit einem Na-K-Phosphat-Puffer ausgewaschen.Der Linsenbrei wurde in einem Thunberg-Röhrchen mit Methylenblau angereichert und anschließend beschallt. In 13 Versuchen konnte eine Verlängerung der Methylenblau-Reduktionszeit festgestellt werden,als Folge einer H_2O_2-Freisetzung.
Um die Ultraschallwirkung auf das Tierauge festzustellen,hat KLEIFELD,O.(17) lebende Kaninchenaugen je 20 Minuten lang im Abstand von 3-4 Tagen beschallt.Es fanden sich bei diesen gesunden Augen keine Schädigungen.Nach Injektion von 0,4cm^3 Citratblut in beide Augen von Kaninchen und anschließender intensiver Beschallung,konnte keine beschleunigte Resorption festgestellt werden.Glasklare Speichen und subcapsuläre Vakuolen zeigten sich bei mit Naphthalin gefütterten und jeden zweiten Tag beschallten Kaninchenaugen.In drei Fällen dieser Versuchsreihe kam es zu einer diffusen Trübung aller Linsenschichten,die auf dem beschallten Auge stärker war als auf dem nicht beschallten.Bei thermischen Untersuchungen an

Schweineaugen wurde zunächst mit Gleichschall gearbeitet.Nach einer Beschalldauer von 10 Minuten ergab sich im Glaskörper eine Temperaturzunahme von 2,8°C,während die maximale und minimale Temperatursteigerung 1,1-4,4°C betrug.Die Behandlung mit Wechselschall,einer Beschalldauer von 20 Minuten erbrachte dagegen im Glaskörper eine Temperaturzunahme von 2,3°C und die maximale und minimale Temperatursteigerung von 1,9-3,0°C.
Im Abstand von drei Tagen,bei einer Beschalldauer von 5,10 und 10 Minuten beschallte KLEIFELD,O.(18) in einem Selbstversuch das linke Auge.Er verwandte das Wechselschallverfahren und eine Intensität von 2-3 W/cm^2.Während der Beschallung trat ein Kribbeln und Ziehen auf.Nach der Behandlung zeigte sich eine leichte gemischte Injektion und ein geringes Epithelödem der Cornea.Der Visus verschlechterte sich von 5/4 auf 5/7.Für 1-2 Tage blieb eine leichte Mydriasis bestehen.Anschließend stellte KLEIFELD bei einem Fall von Sekundärglaucom mit Linsenluxation und Glaskörperprolaps nach der Beschallung eine Schmerzlinderung fest.In zwei Fällen von Glaskörperblutungen kam es zu einer deutlichen Aufhellung,während eine leichte Mydriasis und eine Irishyperämie über längere Zeit bestand.
Ein großes Anwendungsfeld fand der Ultraschall in der Ophthalmologie zur Diagnostik von intraocularen Fremdkörpern,Tumoren und Netzhautablösungen.

OKSALA,A.und A.LETHINEN (27)unternahmen die ersten Versuche,wobei ihnen die Darstellung von intraocularen Fremdkörpern gelang,die eine Mindestgröße von 1mm hatten,und zwar in den vorderen Augenabschnitten mit einer Genauigkeit von 1-2mm,im hinteren Augenabschnitt mit einer Genauigkeit von 2-3mm.Desgleichen konnten OKSALA und LETHINEN Sklerarupturen und Tumoren, die Mindesthöhe von 2mm hatten,lokalisieren und ihre Ausdehnung bestimmen.
NOVER,A.(23)setzte die Versuche fort und fand bei Netzhautablösungen und intraocularen Tumoren zusätzliche Echozacken im sonst normalen Echobild.Eine Netzhautablösung läßt sich aber nur bei einer Mindesthöhe von 1mm(etwa 3dptr) sicher diagnostizieren.Bei intraocularen Tumoren ergeben sich auch dann zusätzliche Echozacken,wenn der Tumor hinter der Netzhaut liegt.
Von grundlegender Bedeutung waren schließlich die Untersuchungen von STALLKAMP,H.(34).Bei der Beschallung von gesunden Augen ordnete er die erhaltenen Echozacken den einzelnen Augenabschnitten zu.Er fand klare Echozacken von der Corneavorderfläche,der Linsenvorder-und Linsenrückfläche und von der Bulbusrückwand. Erhebliche Abweichungen ergeben sich vom normalen Echobild dann,wenn der Schallkopf schief aufgesetzt wird.
Untersuchungen zur Identifizierung der einzelnen Echozacken des Rückwandkomplexes führte BUSCHMANN,W.(4) durch.Durch Abpräparation von Sklerawandschichten,bis nur noch eine ganz

dünne Schicht der Sklera übrig blieb und kein Echo mehr hervorrufen konnte,wies BUSCHMANN nach,daß die erste Echozacke des Rückwandkomplexes von der Netzhaut stammt.
Zu dem gleichen Ergebnis kamen NOVER,A. und W.GROTE(24).Sie spannten eine Netzhaut auf einen isolierten Glaskörper,legten auf die ausgespannte Netzhaut noch einen Glaskörper und erhielten eine Echozacke,die nur von der Netzhaut stammen konnte.Weiterhin fanden NOVER und GROTE eine doppelgipflige Echozacke von der Cornea und von der Sklera.Der erste Gipfel der Zacke entsteht beim Eintritt in die Cornea bzw.in die Sklera,während der zweite Gipfel das Austrittsecho aus dem entsprechenden Medium bedeutet.
YAMAMOTO,Y. und Mitarbeiter(35)bestimmten als erste die Länge der optischen Achse des Auges mit Ultraschall und erweiterten damit den Anwendungsbereich des Ultraschalls in der Ophthalmologie.Sie arbeiteten mit einer Frequenz von 5 MHz und Intensitäten von 5-6 W/cm^2.Der Durchmesser des Schallkopfes betrug 5mm.In seinem Zentrum war eine Lichtquelle eingebaut,die es ermöglichte,den Ultraschall direkt zur Fovea centralis zu lenken.In 23 Fällen von Emmetropie betrug die Länge der optischen Achse im Durchschnitt 23,1mm,bei 63 Fällen von Myopie variierten die gefundenen Werte von 21,5-30,0mm.
GERNET,H.(6)bestimmte ebenfalls die Länge der optischen Achse des Auges am Lebenden.Die Vor-

derkammertiefe wurde optisch mit dem Meßgerät nach JÄGER,W.(15) ermittelt.Die Strecke von der Linsenvorderfläche bis zur Bulbusrückwand wurde mit Ultraschall im Kontaktverfahren bestimmt. Beim Kontaktverfahren wird der Schallkopf,ohne Vorsatzröhrchen,direkt zentral auf die Cornea aufgesetzt.Es fallen dabei das Eingangsecho (vom Apparat)und das Echo der Corneavorderfläche zusammen,so daß dies Verfahren zur Messung der optischen Achse ungeeignet ist.Die Untersuchungen wurden am sitzenden Patienten und in Akkomodationslähmung durchgeführt.Der Schallkopf wurde von einem Assistenten mit der Hand gehalten.

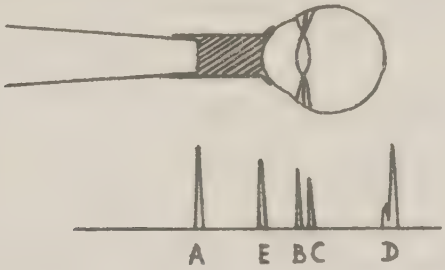


Echogramm beim Kontaktverfahren(schematisiert):

A: Eingangsecho mit Corneavorderflächenecho.
B: Echo der Linsenvorderfläche
C: Echo der Linsenrückfläche
D: Echo der Bulbusrückwand.

Versuchsweise arbeitete GERNET auch mit dem

Vorschaltverfahren.Dabei wird ein Vorsatzröhrchen mit einem Haftschalenansatz versehen,beide mit blasenfreiem Methocel gefüllt,fest auf den Schallkopf gesteckt und ebenfalls zentral auf die Cornea aufgesetzt.



Echogramm beim Vorschaltverfahren(schematisiert):

A: Eigangsecho
B: Echo der Linsenvorderfläche
C: Echo der Linsenrückfläche
D: Echo der Bulbusrückwand
E: Echo der Corneavorderfläche.

Der Vorteil dieser Methode ist,daß das Eingangsecho und das Echo der Corneavorderfläche voneinder getrennt sind und so eine Messung der gesamten optischen Achse vorgenommen werden kann.Die Größe des Nahfeldes ist bei diesem Meßverfahren allerdings zu beachten,da eine Messung außerhalb des Nahfeldes ungenaue Meßwerte liefert.GERNET verwandte das Vorschaltverfahren nicht,da er wegen der rasch abfließenden Kopplungsflüssigkeit

sehr gestörte und nicht auswertbare Echogramme erhielt.
GERNET fand bei seinen Untersuchungen folgende Ergebnisse:

	Emmetropie	Myopie	Hyperopie
Cornea+ Vorderkammer	4,4mm	3,8mm	3,9mm
Linse	3,4mm	4,6mm	3,6mm
Glaskörper	15,7mm	17,9mm	13,9mm
Gesamtlänge der opt.Achse	23,5mm	26,3mm	21,4mm

Ultraschallmessungen der optischen Achse des menschlichen Auges unternahm auch JANSSON,F.(16), nachdem er die Schallausbreitungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Augenmedien bestimmt hatte.Für das menschliche Auge fand er bei einer Temperatur von 37°C für die Vorderkammer 1532m/sec.,für die Linse 1641m/sec.und für den Glaskörper 1532m/sec.
JANSSON arbeitete mit dem Vorschaltverfahren, wobei er auch ein Vorsatzröhrchen mit Haftschalenansatz benutzte.Der Schallkopf lag bei der Ankopplung an das Auge 4mm von der Cornea entfernt.Die Frequenz betrug 4MHz,der Durchmesser des Schallkopfes 5mm.Als Kopplungsmedium diente Methocel.Die Untersuchungen wurden an liegenden Versuchspersonen durchgeführt,nachdem zuvor die Cornea mit Novesin anästhesiert worden war.Für die Corneadicke wurde der von VON BAHR(3) ermittelte Wert von 0,57mm einge-

setzt.Bei den 184 Versuchspersonen,keine war über 50 Jahre alt,fand JANSSON folgende Werte:

Vorderkammertiefe:

Alter	15-19	20-29	30-39	40-49 Jahre
Männer	4,05mm	3,86mm	3,62mm	3,58mm
Frauen	3,87mm	3,73mm	3,54mm	3,45mm

Dicke der Linse:

Alter	15-19	20-29	30-39	40-49 Jahre
Männer	3,48mm	3,61mm	3,88mm	4,19mm
Frauen	3,48mm	3,67mm	4,01mm	4,10mm

Länge des Glaskörpers:

Alter	15-19	20-29	30-39	40-49 Jahre
Männer	16,78mm	16,69mm	16,10mm	15,79mm
Frauen	15,70mm	15,82mm	15,76mm	15,38mm

Für die Länge der optischen Achse ergaben sich für
Männer: 24,00 ±0,10mm (113 Augen),für
Frauen: 23,14 ±0,08mm (71 Augen).

NOVER,A.und W.GROTE(25) verwandten bei der Bestimmung der Länge der optischen Achse des Auges mit Ultraschall an Stelle des Vorsatzröhrchens eine Kunststoffwanne,die mit einem Gummizug fest auf den Orbitarand aufgedrückt wird. Die Wanne wird mit steriler,physiologischer Kochsalzlösung als Kopplungsmedium gefüllt.Der Schallkopf ist an einem Stirnreifen,der dem Patienten aufgesetzt wird,befestigt und ragt in die Kochsalzlösung hinein.Der Patient fixiert, zur Ruhigstellung der Augen,eine über ihm ange-

brachte Lichtquelle.NOVER und GROTE fanden bei ihren Untersuchungen eine zweigipflige Echozakke von der Cornea,wobei der erste Gipfel von der Corneavorderfläche und der zweite Gipfel von der Cornearückfläche stammt.Die erste Zakke des Rückwandechos resultiert nach den Verfassern vom Übergang von Glaskörper zur Retina. Bei Fällen von Myopie fanden NOVER und GROTE, daß die Länge der optischen Achse mit Steigen der Refraktion größer wurde,während bei Fällen von Hyperopie die Länge der Achse mit steigender Refraktion kürzer wird.An emmetropen Augen wurde für Männer 23,21mm und für Frauen 22,61mm gemessen.Werden die Werte von emmetropen,myopen, hyperopen Augen zusammengefaßt,so ergibt sich ein Durchschnittswert von 24,13mm für Männer und von 23,71mm für Frauen.

3. E X P E R I M E T E L L E R T E I L .

3.1. Beschreibung der Geräte.

3.1.1. Das Meßgerät.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das Ultraschall-Impuls-Echogerät (Nr.7014) der Firma Dipl.-Ing.P.KRETZ (Zipf/Oberösterreich) verwandt,das speziell für Augenuntersuchungen entwickelt wurde.Es handelt sich um einen piezoelektrischen Ultraschallgeber.

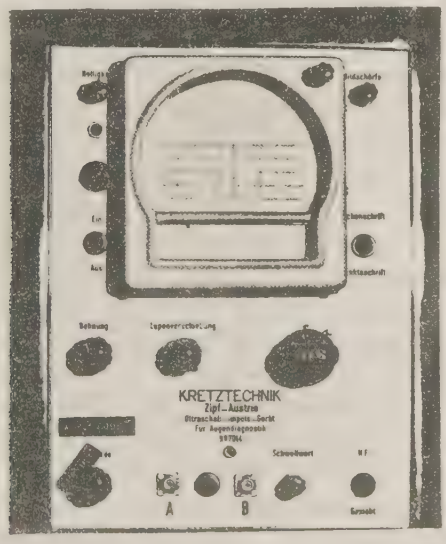


Abb.1: Frontansicht des Ultraschall-Impuls-Echogerätes.

Das Meßgerät besitzt einen Kathodenstrahloszillographen von 13cm Durchmesser.Die auf

ihm abgebildeten Echogramme können mit einer Meßstufe,die in 1000 Teile aufgegliedert ist, ausgemessen werden.Die Messung erfolgt vom vorderen Fußpunkt einer Echozacke bis zum vorderen Fußpunkt der folgenden Echozacke.Um die Feinstruktur einer Echozacke untersuchen zu können,kann das Bild gedehnt werden,während eine Lupenverschiebung die Möglichkeit gibt,die entsprechenden Bildabschnitte genau in die Mitte des Schirmes einzustellen.Bilddehnung und Lupenverschiebung sind mit der Meßstufe gekoppelt,so daß auch bei Dehnung und Verschiebung eine Messung möglich ist. Ein Schwellenwertregler erlaubt das Ausblenden von kleinen Störechos,die beispielsweise durch Schlierenbildung entstehen können.Da die Schwellenwertregelung jedoch eine gewisse Verzerrung der Linearität des Gerätes bewirkt,wurde bei den vorliegenden Untersuchungen von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht.Um auch kleinste Störechos, die im Verlauf einer Echozacke auftreten können,ausblenden zu können,kann das Gerät auf "gesiebt" gestellt werden,wodurch völlig klare Echogramme gewonnen werden.Alle in dieser Arbeit ausgeführten Untersuchungen wurden "gesiebt" vorgenommen.

3.1.2. Schallköpfe.

Das Ultraschall-Impuls-Gerät ist mit drei ebenen,runden Schallköpfen von einem Schwingerdurchmesser von 5mm und Frequenzen von 6,8,10 MHz ausgerüstet (Typ LB 6,LB 8,LB 10). Sie arbeiten gleichzeitig als Sender und Empfänger.Sämtliche Untersuchungen wurden mit dem 10 MHz-Schallkopf durchgeführt,der eine Intensität von 0,0011 W/cm^2 erzielt.Das Nahfeld hat eine Größe von 40,22mm,so daß alle Messungen im Nahfeldbereich durchgeführt wurden.

3.1.3. Haltegerät der Schallköpfe.

Um Störechos,die beim Halten der Schallköpfe mit der Hand auftreten,und die daraus resultierenden Ungenauigkeiten der Meßergebnisse auszuschließen,wurde für die Fixation der Schallköpfe ein Haltestativ gebaut(s.Abb.2). Es kann in verschiedener Höhe eingestellt werden,so daß Messungen auch am Krankenbett durchführbar sind.Ein Mikrometerfeintrieb,an dem der Schallkopf fixiert ist,erlaubt Stellungskorrekturen des Schallkopfes in allen drei Ebenen (s.Abb.3).Weiterhin kann der Schallkopf nach vorn,seitwärts und nach hinten gekippt werden,was eine weitgehende Anpassung an die jeweilige Lage des Auges gestattet.

3.1.4. Koppelungsmittel.

Als Koppelungsmittel zwischen Schallkopf und Cornea wurde dem Methocel wegen seiner zähflüssigen Konsistenz der Vorzug gegenüber dem dünnflüssigen Paraffinöl gegeben.Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Methocel beträgt 1497 m/sec.Es fließt auch bei längerdauernden Untersuchungen nicht ab.

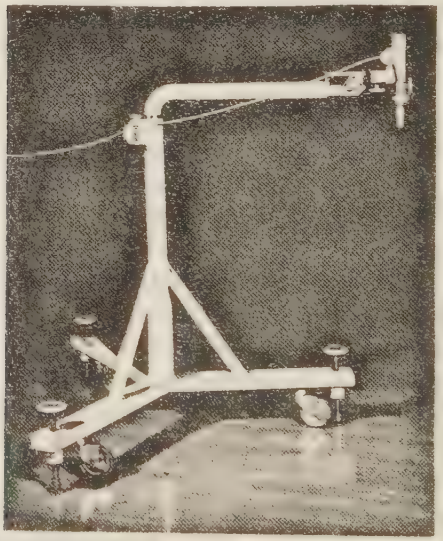


Abb.2: Gesamtansicht des Haltestativs.

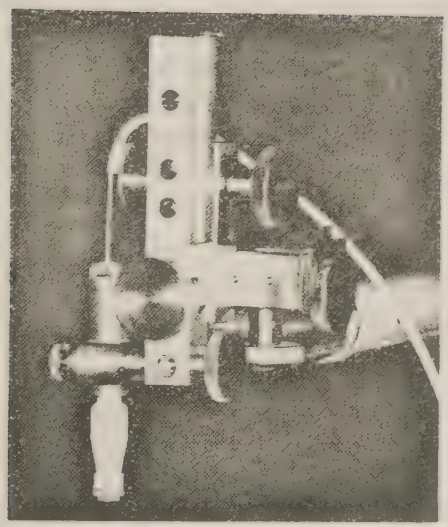


Abb.3: Mikrometerfeintrieb des Haltestativs mit fixiertem Schallkopf.

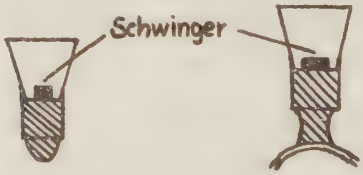
3.2. Eichung des Gerätes.

Da man die Meßergebnisse bei den Untersuchungen in Meßstufeneinheiten erhält,mußte das Ultraschallgerät geeicht werden,um eine Grundlage für die Umrechnung von Meßstufeneinheiten zu Millimetern zu bekommen.Die Eichung wurde an einem Plexiglaseichstück von 10mm Dicke(Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Plexiglas 2700m/sec.) vorgenommen.Insgesamt wurden 30 Eichmessungen im Vorschaltverfahren ausge-

führt,wobei jeweils neu angekoppelt wurde (Methodik s.Abschnitt 3.3.).Für das 10mm dicke Plexiglaseichstück wurden im Durchschnitt 65,17 Meßstufeneinheiten gemessen.Die Standardabweichung betrug ±0,03 Meßstufeneinheiten.Der Fehler war ±0,04 Meßstufeneinheiten groß.

3.3. Meßmethodik.

In der vorliegenden Arbeit wurden alle Messungen im Vorschaltverfahren durchgeführt.Es wird dabei ein Vorsatzröhrchen aus Plexiglas fest auf den Schallkopf aufgesetzt,das eine Länge von 5mm und eine Öffnungsweite von ebenfalls 5mm hat.Mittels einer Saugpipette wird das Vorsatzröhrchen mit blasenfreiem Methocel gefüllt.Bei senkrechter Stellung bildet sich an der Öffnung des Vorsatzröhrchens ein Tropfen,über den an die Cornea zentral angekoppelt wird.



Vorsatzröhrchen mit hängendem Tropfen und bei Ankoppelung zentral an die Cornea.

Durch die geringe Öffnungsweite des Vorsatzröhrchens von nur 5mm ist der sich bildende Tropfen so klein,daß bei den Messungen keine

gestörten Echogramme durch schnelles Abfließen der Koppelungsflüssigkeit oder durch Schlierenbildung entstehen,sondern der Tropfen bleibt in seiner Form bestehen.Die Ankoppelung über einen Tropfen bietet weiterhin den Vorteil,daß keinerlei Druck auf den Bulbus ausgeübt wird,so daß Meßfehler durch Druckdeformation ausgeschlossen sind.

Alle Untersuchungen wurden an liegenden Versuchspersonen durchgeführt.Dies ist besonders deswegen vorteilhaft,weil sie entspannt liegen können;sie werden dabei angehalten,eine Lichtquelle an der Decke des Untersuchungsraumes zu fixieren.Die Messungen wurden bei Akkommodationslähmung und nach Oberflächenanästhesie der Cornea mit Kerakain vorgenommen.

Die mit dieser Methode gewonnenen Echogramme zeigen Echozacken von der Corneavorderfläche, der Linsenvorder-und Linsenrückfläche und ein zweigipfliges Echo von der Bulbusrückwand. (s.Abb.4).

Störechos,wie sie bei den Untersuchungen immer wieder auftreten,lassen sich durch ihre Unbeständigkeit in Form und Größe der Echozacken von denen der einzelnen Augenmedien unterscheiden,die sich nur bei Stellungsänderungen des Schallkopfes verändern.

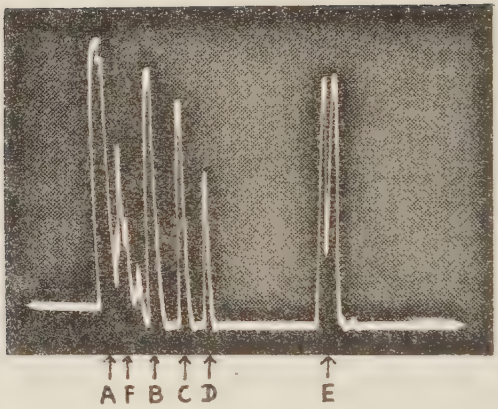


Abb.4: Echogramm eines emmetropen 25jährigen Mannes ("gesiebt").
A: Eingangsecho
B: Corneavorderflächenecho
C: Linsenvorderflächenecho
D: Linsenrückflächenecho
E: Doppelgipfliges Bulbuswandecho
F: Störecho.

3.4. Berechnungen.

Bei der Berechnung der Meßgrößen fanden die bei der Eichung ermittelten Werte(s.Abschnitt 3.2.), sowie die Schallausbreitungsgeschwindigkeiten für die einzelnen Augenmedien nach JANSSON,F.(16) Verwendung:

Vorderkammer:	1532m/sec.
Linse :	1641m/sec.
Glaskörper :	1532m/sec.

Für ein Plexiglaseichstück von 10mm Dicke und einer Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 2700m/sec. wurden im Durchschnitt 65,17 Meßstufeneinheiten gemessen:

$$\frac{10}{65{,}17\ 2700}$$

Die zu ermittelnde Größe des jeweiligen Augenabschnittes X(mm), wobei der Wert des gemessenen Augenmediums Y in Meßstufeneinheiten und die Schallausbreitungsgeschwindigkeit V bekannt sind, lautet dann:

$$\frac{10}{65{,}17\ 2700} = \frac{X}{Y\ \ V}$$

Nach X aufgelöst ergibt sich:

$$X = \frac{10\ \ Y\ \ V}{65{,}17\ 2700}$$

<u>Beispiel:</u>

	Meßstufeneinheiten		
Vorderkammer + Cornea	48	$\frac{10\ 48\ 1532}{65{,}17\ 2700}$ =	4,24mm
Vorderkammer			3,67mm
Linse	45	$\frac{10\ 45\ 1641}{65{,}17\ 2700}$ =	4,20mm
Glaskörper	199	$\frac{10\ 199\ 1532}{65{,}17\ 2700}$ =	17,33mm
Gesamtlänge der optischen Achse			25,77mm

Um die Vorderkammertiefe allein zu erhalten, wurde der von VON BAHR (3) ermittelte Durchschnittswert für die Dicke der Cornea von 0,57mm subtrahiert.

3.4.1. Rechentabellen.

Um die Meßgrößen leichter ermitteln zu können, wurde ein größerer Meßstufenbereich in Millimeter umgerechnet und in Tabellen zusammengefaßt.

Tabelle 1: Vorderkammertiefe.

Meßstufen-einheiten	mm
30	2,04
31	2,12
32	2,22
33	2,30
34	2,39
35	2,48
36	2,56
37	2,65
38	2,74
39	2,83
40	2,92
41	3,00
42	3,09
43	3,17
44	3,26
45	3,35
46	3,44
47	3,52
48	3,61
49	3,70
50	3,78
51	3,87
52	3,96

Tabelle 2: Linsendicke

Meßstufen-einheiten	mm
30	2,80
31	2,89
32	2,98
33	3,08
34	3,17
35	3,26
36	3,36
37	3,45
38	3,54
39	3,64
40	3,73
41	3,82
42	3,92
43	4,01
44	4,10
45	4,19
46	4,29
47	4,38
48	4,48
49	4,57
50	4,66
51	4,76
52	4,85
53	4,94
54	5,04
55	5,13

Tabelle 3: Glaskörper

Meßstufen-einheiten	mm
175	15,24
176	15,32
177	15,41
178	15,50
179	15,58
180	15,67
181	15,76
182	15,85
183	15,93
184	16,02
185	16,11
186	16,19
187	16,28
188	16,37
189	16,46
190	16,54
191	16,63
192	16,72
193	16,80
194	16,89
195	16,98
196	17,06
197	17,15
198	17,24
199	17,33
200	17,41

3.4.2. Testbogen.

Ein Testbogen für die Untersuchung stellt eine weitere Erleichterung dar.Er enthält die klinische Diagnose,Meßmethodik,Meßwerte und deren Beurteilung:

Name: K.S.
Alter: 69 Jahre Krankenblatt: Station:Mä.I.

Klinische Diagnose: Primäres Glaucom beiderseits

Ultraschalluntersuchung:
Vorschaltverfahren;Schallkopf:10MHz,Intensität: 0,0011W/cm^2;Kopplung über Methocel.

	Re.Auge	Li.Auge
VK + Cornea	2,18mm	3,22mm
VK	1,61mm	2,65mm
Linse	5,60mm	5,13mm
GK	14,80mm	15,24mm
Gesamtlänge der optischen Achse	22,58mm	23,59mm

Beurteilung:
Die Vorderkammer ist auf beiden Seiten weitgehend abgeflacht (Durchschnittswert aus 30 Messungen: 3,18mm).Die Linse des re. und li. Auges liegt außerhalb der Norm (Durchschnittswert aus 30 Messungen dieser Altersklasse: 4,78mm).

3.4.3. Statistik.

Die in der vorliegenden Arbeit angefertigten statistischen Berechnungen,wie die Bestimmung des Fehlers,die Varianzanalyse mehrerer Durchschnitte und der t-Test,wurden mit Hilfe der "Statistischen Rechenblätter" nach HEITE,H.-J. (10) ausgeführt.

3.5. Material.

Im ersten Teil der Arbeit wurde die Meßmethodik an 50 Schweineaugen (von frisch geschlachteten Tieren) erprobt und verbessert.Im zweiten Teil wurden normalsichtige und klinisch unauffällige menschliche Augen untersucht.Die 145 Untersuchungen wurden in 5 Altersgruppen eingeteilt und umfassen das Alter vom 20. bis zum 69. Lebensjahr.

3.6. Ergebnisse.

3.6.1. Ergebnisse an Tieraugen.

Bei den untersuchten Schweineaugen handelt es sich nicht um ein bestimmtes Lebensalter.Es wurden zur Umrechnung von Meßstufeneinheiten zu Millimetern die von OKSALA,A. und A.LETHINEN (26) ermittelten Schallausbreitungsgeschwindigkeiten in Schweineaugen verwandt:

Vorderkammer:	1510m/sec.
Linse :	1653m/sec.
Glaskörper :	1510m/sec.

Zur Bestimmung der Vorderkammertiefe wurde

vom gemessenen Wert 0,57mm subtrahiert,die durchschnittliche Corneadicke des menschlichen Auges,da keine Untersuchungen über die Corneadicke bei Schweinen vorlagen.
Bei den 50 Messungen fanden sich folgende Ergebnisse:

		Mittlerer Fehler des Mittelwertes
Vorderkammer	2,18mm	±0,06mm
Linse	7,96mm	±0,11mm
Glaskörper	11,46mm	±0,16mm
Gesamtlänge der optischen Achse	22,19mm	±0,23mm

3.6.2. Ergebnisse an menschlichen Augen.

Bei den Werten für die Vorderkammertiefe ergeben sich zwei Ungenauigkeiten,da erstens die Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Corneagewebe nicht bestimmt ist,und zweitens für die Corneadicke ein Durchschnittswert verwandt.wird.

3.6.2.1. Fehler der Methodik.

Um die Größe des Meßfehlers genau zu bestimmen,wurde an einem Auge,innerhalb von 24 Stunden,eine Meßserie von 30 Messungen durchgeführt,wobei immer neu an die Cornea angekoppelt wurde.

Es fanden sich folgende Ergebnisse:

		Mittlerer Fehler des Mittelwertes
Vorderkammer	2,69mm	±0,08mm
Linse	5,63mm	±0,05mm
Glaskörper	15,57mm	±0,07mm
Gesamtlänge der optischen Achse	24,46mm	±0,11mm

Bei diesem 56 Jahre alten Patienten sind die Abweichungen von den "normalen" Mittelwerten den Veränderungen des Auges nach Verschluß der Zentralarterie zuzuschreiben.

3.6.2.2. Vorderkammertiefe.

	Anzahl		Werte		Mittel-	
Alter	M	F	M	F	wert)$^{+}$	Fehler))$^{++}$
20-29	16	14	3,69mm	3,41mm	3,56mm	±0,22mm
30-39	18	8	3,45mm	3,29mm	3,41mm	±0,20mm
40-49	19	10	3,25mm	3,18mm	3,22mm	±0,20mm
50-59	10	20	3,24mm	3,01mm	3,09mm	±0,22mm
60-69	9	21	3,18mm	2,90mm	3,01mm	±0,18mm

Die mit)$^{+}$ und))$^{++}$ gekennzeichneten Werte geben den Mittelwert und den mittleren Fehler des Mittelwertes von allen Messungen der entsprechenden Altersgruppe an. Dies gilt auch für die folgenden Ergebnisse.

Der t-Test nach Varianzanalyse zeigt folgendes Schlußurteil:

Die kleinste signifikante Differenz zwischen zwei beliebigen Durchschnitten $\bar{x}_i$ beträgt bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von

0,1% - 1,011
1,0% - 0,785
5,0% - 0,595
10,0% - 0,499

Der Gruppenvergleich der Vorderkammertiefe ergibt dann folgende signifikante Differenzen:

Jahre	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69
20-29	-	./.	./.	10%	5%
30-39	./.	-	./.	./.	10%
40-49	./.	./.	-	./.	./.
50-59	10%	./.	./.	-	./.
60-69	5%	10%	./.	./.	-

3.6.2.3. Dicke der Linse.

	Anzahl		Werte		Mittel-	
Alter	M	F	M	F	wert)+	Fehler))++
20-29	16	14	3,86mm	3,71mm	3,78mm	±0,28mm
30-39	18	8	3,95mm	3,84mm	3,91mm	±0,23mm
40-49	19	10	4,32mm	4,21mm	4,33mm	±0,30mm
50-59	10	20	4,61mm	4,32mm	4,46mm	±0,32mm
60-69	9	21	4,78mm	4,77mm	4,62mm	±0,32mm

Der t-Test nach Varianzanalyse zeigt folgendes Schlußurteil:
Die kleinste signifikante Differenz zwischen

zwei beliebigen Durchschnitten $\bar{x}_i$ beträgt bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von

0,1% - 0,504
1,0% - 0,392
5,0% - 0,297

Der Gruppenvergleich der Linsendicke ergibt dann folgende signifikante Differenzen:

Jahre	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69
20-29	–	./.	0,1%	0,1%	0,1%
30-39	./.	–	1,0%	0,1%	0,1%
40-49	0,1%	1,0%	–	./.	5%
50-59	0,1%	0,1%	./.	–	./.
60-69	0,1%	0,1%	5%	./.	–

3.6.2.4. Länge des Glaskörpers.

	Anzahl		Werte		Mittel-	
Alter	M	F	M	F	wert)+	Fehler))++
20-29	16	14	16,47mm	16,04mm	16,34mm	±0,42mm
30-39	18	8	16,53mm	16,22mm	16,42mm	±0,44mm
40-49	19	10	16,54mm	15,72mm	16,26mm	±0,43mm
50-59	10	20	16,57mm	15,88mm	16,13mm	±0,57mm
60-69	9	21	16,22mm	15,87mm	16,16mm	±0,60mm

Die Varianzanalyse der Glaskörperwerte ergab keine Signifikanz.

3.6.2.5. Länge der optischen Achse des Auges.

Alter	Anzahl M	Anzahl F	Werte		Mittelwerte)+	Fehler))++
20-29	16	14	24,33mm	23,81mm	24,23mm	±0,58mm
30-39	18	8	24,44mm	24,23mm	24,40mm	±0,44mm
40-49	19	10	24,68mm	24,02mm	24,39mm	±0,43mm
50-59	10	20	24,77mm	24,18mm	24,27mm	±0,58mm
60-69	9	21	24,76mm	24,19mm	24,26mm	±0,55mm

Die Varianzanalyse der Werte der Gesamtlänge der optischen Achse des Auges ergibt keine Signifikanz.

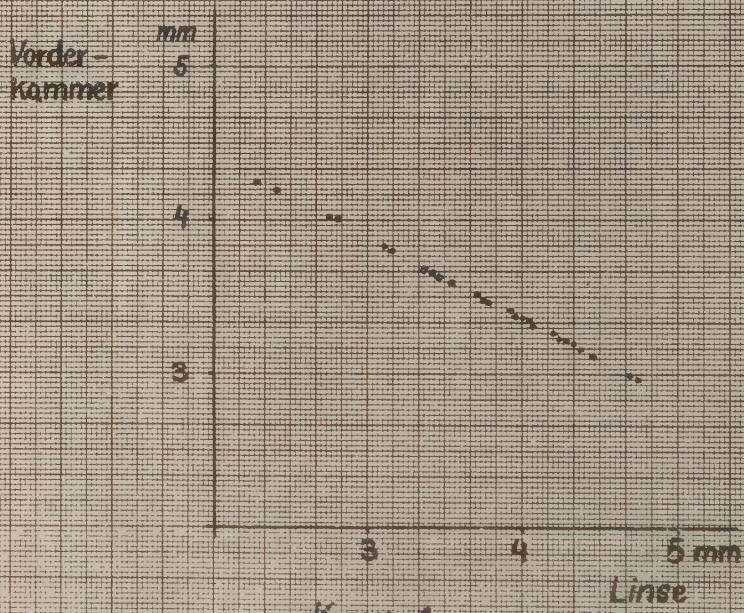
3.7. Relationen der Meßgrößen.

3.7.1. Linse - Vorderkammer.

Die enge Beziehung zwischen Linsendicke und Vorderkammertiefe wird durch die Korrelationskurve, bei einem Bestimmtheitsmaß von r^2=0,666, dem Korrelationskoeffizient r= -0,816 und der negativen Steigung von b= -0,482, deutlich aufgezeigt. Mit dem Linsenwachstum nimmt die Vorderkammertiefe stetig ab (s. Kurve 1).
Die Altersabhängigkeit von Linsendicke und von der Vorderkammertiefe zeigen die Kurven 2 und 3 auf. Die geringe Anzahl der in die Kurven eingetragenen Punkte resultiert aus der Gleichheit vieler Meßergebnisse.

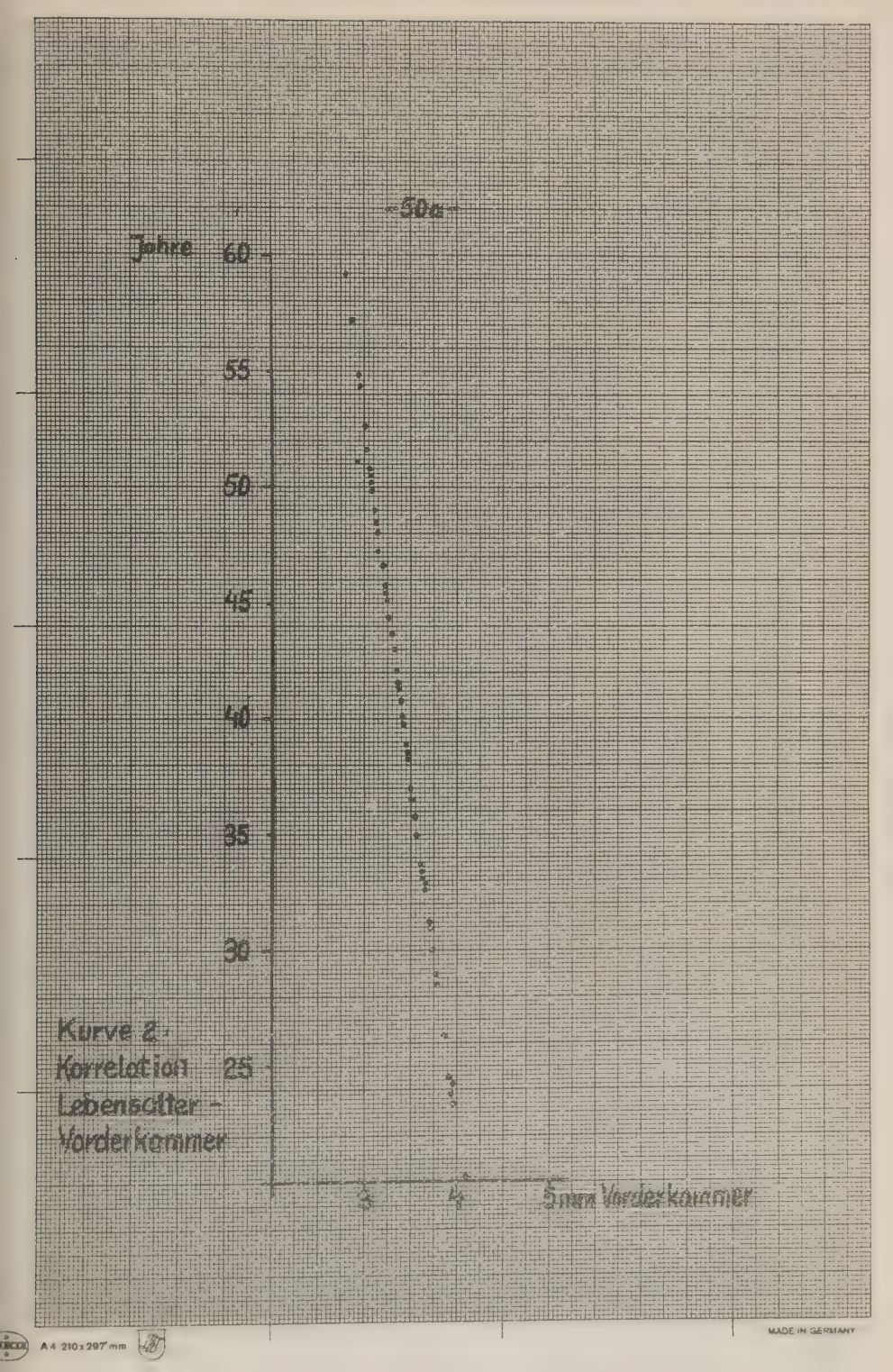
3.7.2. Linse - Glaskörper.

Die Korrelationskurve von Linse-Glaskörper zeigt einen etwa ähnlichen Verlauf. Die Steigung beträgt b= -0,748, das Bestimmtheitsmaß r^2=0,104 und der Korrelationskoeffizient r= -0,323. Mit steigendem Linsenwachstum nimmt die Länge des Glaskörpers ab (s. Kurve 4).

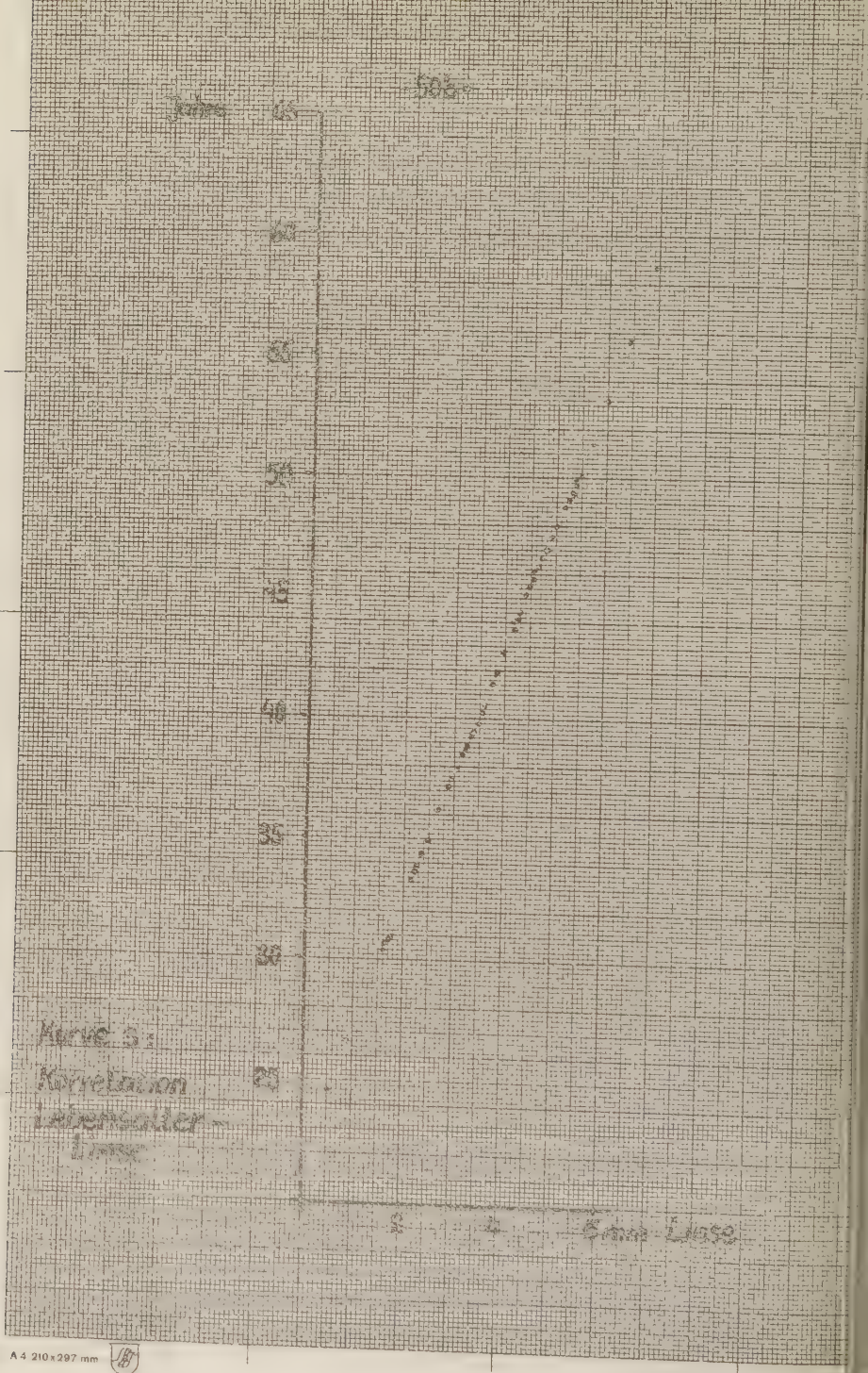


Kurve 1.
Korrelationskurve Linse - Vorderkammer

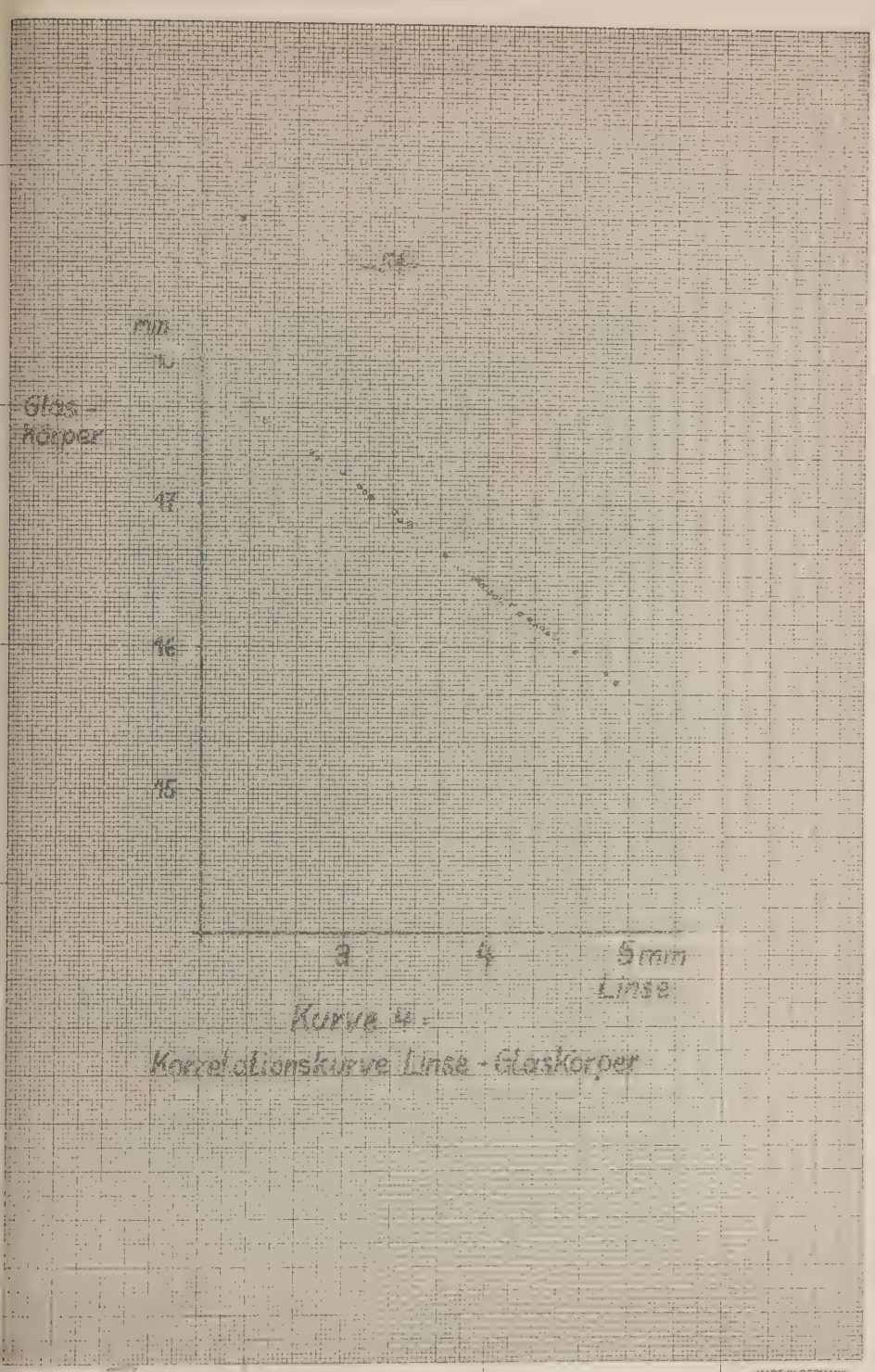
SELECTA A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY



A 4 210x297 mm
MADE IN GERMANY



A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERM



Kurve 4:
Korrelationskurve Linse - Glaskörper

A4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY

3.8. Diskussion.

Die Ultraschall-Biometrie des menschlichen Auges ist mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet, da es sich erstens um ein hochempfindliches Meßobjekt handelt, das dem Willen der Versuchsperson nur bedingt unterworfen ist, zweitens sind individuelle Abweichungen von der durch JANSSON, F. (16) bestimmten Schallausbreitungsgeschwindigkeit in den optischen Medien möglich, besonders in der Linse. Durch den schalenförmigen Linsenaufbau wird sie zu einem schallinhomogenen Körper. Beim Durchgang der Ultraschallwellen durch die einzelnen Linsenschalen wird sich, entsprechend dem Aufbau und der Zusammensetzung der Schalen, auch die Schallausbreitungsgeschwindigkeit jeweils ändern. Die von JANSSON, F. angegebene Schallausbreitungsgeschwindigkeit für die Linse von 1641m/sec. stellt einen Mittelwert mit einer Schwankungsbreite von ±1,3m/sec. dar. Werden z.B. 44 Meßstufeneinheiten gemessen, so lauten die Ergebnisse: Bei 1642,3m/sec. = 4,106mm,
bei 1641,0m/sec. = 4,103mm,
bei 1639,7m/sec. = 4,100mm.

Wenn diese Abweichungen auch nur sehr geringfügig sind, so zeigen sie doch, daß sie bei starken Linsenveränderungen durchaus größere Ungenauigkeiten verursachen können.

In der vorliegenden Arbeit wird, wie auch bei JANSSON, das Vorschaltverfahren verwandt, wobei auf den Haftschalenansatz verzichtet wird. Die Ankoppelung an die Cornea erfolgt über einen "hängenden Tropfen" des Koppelungsmediums. Diese

Methodik bietet drei Vorteile.Erstens ist sie für die Versuchsperson schonender,zweitens können keine Luftblasen eine Messung unmöglich machen und drittens ist eine Druckdeformation des Bulbus ausgeschlossen.
Im Gegensatz zu JANSSON und GERNET,H.(6)wird der Schallkopf an einem Haltestativ befestigt und ist nur über einen Mikrometerfeintrieb beweglich,was ein Arbeiten mit weitgehend störfreien Echogrammen ermöglicht.
Die mit dieser Methodik gewonnenen Werte zeigen eine Abflachung der Vorderkammer mit steigendem Lebensalter.Die größte Verringerung der Vorderkammertiefe liegt zwischen dem 20.-49. Lebensjahr und fällt mit dem stärksten Linsenwachstum zusammen.Nachdem SMITH,PR.(32) eine kontinuierliche Zunahme des äquatorialen Durchmessers der Linse mit steigendem Lebensalter fand,bestätigen JANSSONs und die vorliegenden Ergebnisse die Untersuchungen von SNYDACKER,D. (33) und die Annahme von SCHMUTTER,J.(31),daß die Linse auch in ihrem Poldurchmesser mit steigendem Lebensalter wächst.Auffällig ist das Linsenwachstum vornehmlich in die Richtung der Vorderkammer,während ein Vordringen in den Glaskörper mit Verringerung der Länge des Glaskörpers erst vom 60.-69.Lebensjahr einzutreten scheint.

3.9. Zusammenfassung.

Nach einer Einführung in die Problemstellung der vorliegenden Arbeit,wird im Literaturteil eine Übersicht über die Physik des Ultraschalls gegeben.Einzelne Anwendungsbereiche des Ultraschalls in der Medizin werden nur gestreift, während die Verwendung des Ultraschalls in der Ophthalmologie einen großen Raum einnimmt und die Entwicklung der Ultraschalltechnik in der Klinik aufzeigt.

Im experimentellen Teil der Arbeit wird die Methode der Ankoppelung des Schallkpfes an die Cornea über einen "hängenden Tropfen" des Koppelungsmediums beschrieben,wobei der Schallkopf an einem Haltestativ fixiert ist.

Die gewonnenen Ergebnisse stellen Normwerte von emmetropen Augen dar.Sie zeigen mit steigendem Lebensalter eine Abflachung der Vorderkammer,bei gleichzeitigem Linsenwachstum,das vornehmlich zur Vorderkammer hin gerichtet ist.

L E B E N S L A U F.

Am 26.9.1938 wurde ich,Udo Sprenger,als Sohn des Arztes Dr.med.Erich Sprenger und seiner Ehefrau Johanna Sprenger,geb.Szeleszus,in Königsberg/Pr.geboren.Ich bin evangelisch.
In Horstedt/Krs.Rotenburg besuchte ich die 4jährige Grundschule,anschließend das Gymnasium in Verden/Aller und dann die Oberschule in Rotenburg/Hann.Die Reifeprüfung bestand ich am Gymnasium Am Barkhof in Bremen am 25.2.1960.
Im Sommersemester 1960 begann ich das Studium der Medizin an der Universität in Köln,wo ich im April 1961 das Vorphysikum und im Oktober 1962 das Physikum ablegte.Nach dem 1.klinischen Semester wechselte ich zur Universität Bonn; dort bestand ich am 17.2.1966 das medizinische Staatsexamen.Seit April 1966 arbeite ich als Medizinalassistent in der chirurgischen Abteilung des Herz-Jesu-Krankenhauses in Fulda.

Herrn Privatdozent Dr.Otto Hockwin
danke ich für die Überlassung der Arbeit,
für den ständigen Rat und die Hilfe bei
der Abfassung der Arbeit.
Herrn Prof.Dr.E.Weigelin und Herrn Dr.Trier
danke ich für die Diskussion der Meßgrößen.